

**ДНЕВНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛОТНОСТЬ
НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F1
ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТАНЦИИ ИРКУТСК**

**DAYTIME ELECTRON DENSITY AT IONOSPHERIC F1-LAYER HEIGHTS
DURING GEOMAGNETIC STORMS (IRKUTSK)**

Г.П. Кушнаренко 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kusch@iszf.irk.ru*

Г.М. Кузнецова 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kuz@iszf.irk.ru*

О.Е. Яковлева 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yakovleva@iszf.irk.ru*

G.P. Kushnarenko

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kusch@iszf.irk.ru*

G.M. Kuznetsova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kuz@iszf.irk.ru*

O.E. Yakovleva

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru*

Аннотация. Исследованы изменения в электронной плотности N_e на высотах слоя F1 во время геомагнитных бурь на ионосферной станции Иркутск (52° N, 104° E). Геомагнитные бури разной интенсивности, а также спокойные дни для каждого события были выбраны для зимних и летних сезонов в 2003 г. Анализ электронной плотности во время возмущений проведен в дневной период на высотах 150–190 км, на которых в разные сезоны обнаружено разное воздействие геомагнитных бурь на N_e . Наблюдается незначительное изменение плотности электронов во время летних геомагнитных бурь. С другой стороны, имеет место интересный эффект зимой, указывающий на летне-зимнюю асимметрию отклика N_e на геомагнитные бури на этих высотах в 2003 г.: заметно существенное влияние возмущений на высоте 190 км и в меньшей степени — на нижних высотах.

Ключевые слова: электронная концентрация, зимне-летняя асимметрия отклика N_e на геомагнитные бури.

Abstract. We have examined variations in electron density N_e at ionospheric F1-layer heights during geomagnetic storms at the Irkutsk ionospheric station (52° N, 104° E). We have selected geomagnetic storms of varying intensity as well as quiet days for each event for the winter and summer seasons of 2003. We have analyzed the electron density in the daytime during geomagnetic storms at 150–190 km heights. Different effects of geomagnetic storms on N_e in different seasons at these heights were found. There is a slight change in the electron density during summer geomagnetic storms. On the other hand, there is an interesting effect in winter indicating the summer-winter asymmetry of the N_e response to the geomagnetic storms at these heights in 2003: in winter there is a significant influence of disturbances on N_e at a height of 190 km and a smaller effect at lower heights.

Keywords: electron density, winter-summer asymmetry of the electron density N_e response to geomagnetic storms.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные возмущения создают различные изменения в сложной системе атмосфера—ионосфера, воздействуя на электрические поля, температуру, ветер и газовый состав, и влияют на все ионосферные параметры. Имеется довольно много публикаций по воздействию геомагнитных бурь на ионосферу, в частности, на высотах слоя F1 [Buresova, Lastovicka, 2001; Buresova et al., 2002; Кушнаренко и др., 2013, 2018; Mikhailov, Schlegel, 2003]. Однако нет достаточно ясного понимания некоторых механизмов, объясняющих реакцию ионизации во время геомагнитных бурь на этих высотах. Наша работа связана с анализом дневной электронной плотности в интервале высот 150–190 км. Этот диапазон — часть нижней ионосферы, где при некоторых условиях образуется слой F1. Далее в тексте термин «высоты F1-слоя» будет использоваться вместо тер-

мина «F1-слой», поскольку F1-слой не существует как отдельный слой зимой в невозмущенных условиях в средних широтах. Однако, согласно отдельным наблюдениям [Полех и др., 2019], во время достаточно сильных геомагнитных бурь F1-слой разбивается даже зимой.

Имея в виду ультрафиолетовое излучение, проникающее во все ионосферные области, учитывая их газовый состав и различные структурные особенности, можно ожидать разную реакцию каждой области на вызванные штормом возмущения. Целью настоящего исследования в продолжение предыдущих работ [Кушнаренко и др., 2013, 2018] является расширение знаний относительно отклика ионосферной F1-области на геомагнитные возмущения. Анализ проводится с привлечением данных по штормам для двух сезонов (зимнего и летнего) в год повышенной (2003 г.) геомагнитной активности [Панасюк

и др., 2004]. Аналогичное исследование с обнаружением разного отклика электронной плотности N_e на воздействие геомагнитных бурь в летние и зимние сезоны было проведено авторами работы [Buresova et al., 2002] для нескольких европейских среднеширотных обсерваторий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа выбран период 2003 г., содержащий много возмущенных дней в летний сезон (май–август) и в зимние месяцы (январь–февраль и ноябрь–декабрь). Использовались значения N_e , полученные по измерениям Иркутского дигизонда (52° N, 104° E). Изучение ограничивалось дневным временем и высотным интервалом 150–190 км. В табл. 1, 2 перечислены геомагнитные события, проанализированные в настоящей работе, и соответствующие им геомагнитные индексы A_p и Dst [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Спокойные дни с $A_p < 10$ были выбраны для сравнения с каждой бурей [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

Поскольку сильные геомагнитные бури вблизи равноденствий происходят приблизительно в пять раз чаще, чем вблизи зимнего или летнего солнцестояний [Buresova et al., 2002], число летних и зимних событий в анализе меньше и они имеют меньшие интенсивности в сравнении с весенними и осенними бурями.

ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ В ЛЕТНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

В отличие от зимних событий в летний период 2003 г. геомагнитные возмущения по силе воздействия относятся к слабым и умеренным, поэтому мы также привлекали их к анализу. Но встречается и несколько сильных бурь. Дневные вариации N_e в течение всех дней максимального развития возмущений довольно похожи. Отсутствует заметное воздействие летних геомагнитных бурь на электронную плотность на высотах области F1 даже во время сильных возмущений. Так, сильная 29.05 ($A_p=108$), умеренная 11.07 ($A_p=52$) и слабая 03.06 ($A_p=29$) бури почти не отличаются по своему воздействию на ионизацию на высоте 190 км (см. рис. 1, а, лето): в возмущенные дни значения N_e меняются, как и в спокойные дни, от $2.5 \cdot 10^5$ до $3.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Отметим, что во время сильной бури 18.08 ($A_p=108$) N_e на высоте 190 км значительно уменьшилась от спокойных значений $3.6 \cdot 10^5$ до $2.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, заметно также понижение N_e и на нижних высотах. Эта буря подтверждает вывод [Кушнаренко и др., 2018] о более глубоком проникновении эффектов сильных геомагнитных возмущений на высоты слоя F1 на средних широтах.

Все рассмотренные летние бури, за исключением двух сильных (29.05 и 18.08 с $A_p=108$), можно отнести к слабым и умеренным с индексами A_p , меняющимися от 20 до 60 (см. табл. 1). Летние возмущения почти не влияют или слабо воздействуют на ионизацию на высотах слоя F1. На рис. 2, а показаны изменения N_e на трех высотах в спокойный и возмущенный летние дни. Отклонения N_e от спокойного

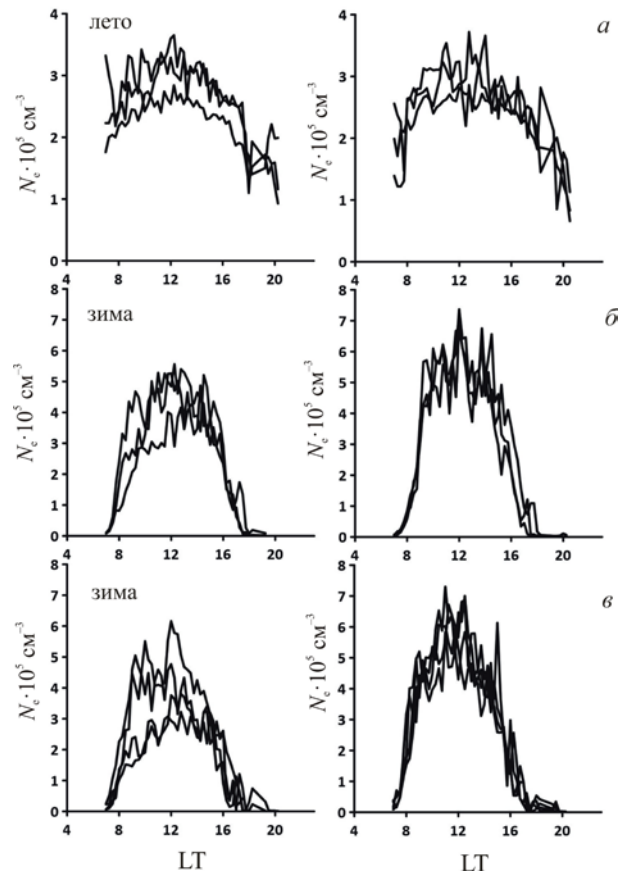


Рис. 1. Дневная вариация N_e на высоте 190 км в возмущенные (левая панель) и спокойные (правая панель) дни: а — летние бури; б — зимние бури в начале года; в — зимние бури в конце года

уровня слабы или отсутствуют совсем. Воздействие других анализируемых летних бурь на N_e аналогично описанной схеме.

Итог по летним бурям: отклик N_e на летние умеренные, сильные и слабые бури 2003 г. довольно слаб или совсем отсутствует и мало зависит от интенсивности бури. Исключение составляет одна сильная буря 18.08 ($A_p=108$) с более глубоким проникновением на высоты слоя F1.

ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ В ЗИМНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Зимние возмущения можно условно разделить на две группы: бури в начале года (январь–февраль) и в конце — (ноябрь–декабрь) (см. табл. 2). Первый период характеризуется наличием почти сплошных умеренных и довольно сильных геомагнитных возмущений. В этот период сложно найти для сравнения спокойные дни.

В зимнее время воздействие геомагнитных возмущений на электронную плотность значительно проявляется на высоте 190 км, заметное влияние наблюдается на 170 км и менее заметное — ниже. Высота 190 км является показателем воздействия геомагнитных бурь на N_e . Здесь нагляднее всего проявляются изменения N_e в период возмущений. На рис. 1, б, в показано дневное поведение N_e на высоте 190 км для нескольких зимних бурь в начале и в конце 2003 г. в сравнении со спокойными днями.

Таблица 1

Анализируемые геомагнитные бури (лето 2003 г.)

Спокойные дни	День начала бури	Индексы (A_p, Dst)	Время максимума бури (UT)
17.05	29.05	$A_p=108, Dst=-133$	30.05 в 02:00
17.05	31.05	$A_p=20, Dst=-46$	31.05 в 05:00
05.06	01.06	$A_p=22, Dst=-40$	02.06 в 04:00
05.06	02.06	$A_p=38, Dst=-91$	02.06 в 09:00
05.06	03.06	$A_p=29, Dst=-38$	03.06 в 01:00
20.06	11.07	$A_p=52, Dst=-55$	11.07 в 11:00
09.07	12.07	$A_p=52, Dst=-105$	12.07 в 06:00
09.07	16.07	$A_p=48, Dst=-70$	16.07 в 14:00
09.07	08.08	$A_p=33, Dst=-40$	08.08 в 09:00
05.08	12.08	$A_p=39, Dst=-20$	12.08 в 09:00
05.08	18.08	$A_p=108, Dst=-119$	18.08 в 09:00
05.08	21.08	$A_p=39, Dst=-62$	21.08 в 24:00

Таблица 2

Анализируемые геомагнитные бури (зима 2003 г.)

Спокойные дни	День начала бури	Индексы (A_p, Dst)	Время максимума бури (UT)
(14–16).01	20.01	$A_p=39, Dst=-33$	20.01 в 05:00
(14–16).01	25.01	$A_p=28, Dst=-46$	25.01 в 24:00
(14–16).01	30.01	$A_p=48, Dst=-66$	30.01 в 01:00
24.02	02.02	$A_p=52, Dst=-59$	02.02 в 16:00
24.02	04.02	$A_p=31, Dst=-54$	04.02 в 10:00
25.02	27.02	$A_p=30, Dst=-60$	27.02 в 21:00
27.11	11.11	$A_p=61, Dst=-50$	11.11 в 14:00
27.11	13.11	$A_p=52, Dst=-36$	14.11 в 07:00
27.11	20.11	$A_p=150, Dst=-156$	21.11 в 07:00
17.12	05.12	$A_p=39, Dst=-48$	06.12 в 04:00
18.12	10.12	$A_p=41, Dst=-50$	10.12 в 12:00
19.12	21.12	$A_p=24, Dst=-22$	21.12 в 17:00

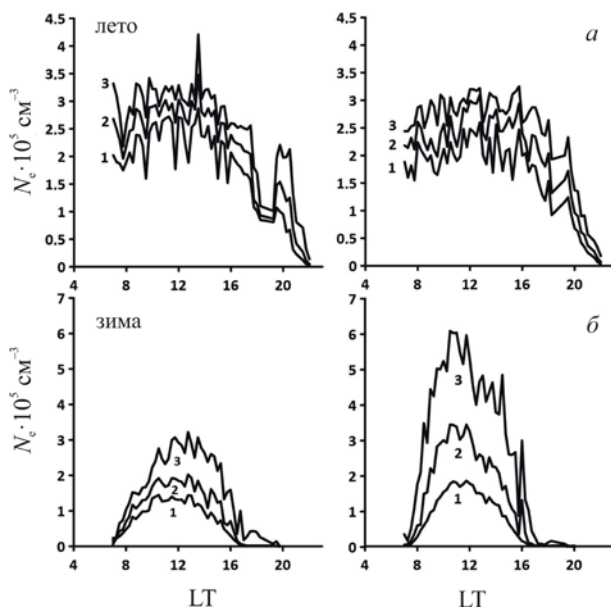


Рис. 2. Дневные вариации N_e в возмущенные (левая панель) и спокойные (правая панель) дни летом (буря 12.07.2003) (а) и зимой (буря 11.11.2003) (б) на высотах: 1 — 150 км; 2 — 170 км; 3 — 190 км

В начале года в спокойные дни января N_e менялась от $4 \cdot 10^5$ до $7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Во время умеренных возмущений в дни их максимального развития N_e уменьшается на высоте 190 км в среднем от $4 \cdot 10^5$ до $5.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$

для бурь 02.02 и 04.02 и от $2 \cdot 10^5$ до $4.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ для бурь в дни 30.01 и 27.02. В конце года (ноябрь–декабрь) вариации N_e на высоте 190 км аналогичны изменениям в начале года. Существует большой разброс N_e для бурь с разной интенсивностью, причем это разделение не зависит от величины индекса A_p .

Значительное изменение N_e на трех высотах в возмущенный день 11.11 показывает рис. 2, б (левая панель) в сравнении со значениями N_e в спокойный день (правая панель): на высоте 190 км в околополуденный период N_e уменьшается до значений $(2 \div 3.2) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ от величин $(4 \div 6) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ в спокойный день. На нижних высотах влияние возмущения также заметно: на 170 км N_e уменьшаются с $3.5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, на 150 км — с $1.9 \cdot 10^5$ до $1.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Анализ изменений N_e в другие бури показал, что эффекты зимних геомагнитных событий на всех высотах различаются по силе воздействия, даже при одинаковых характеристиках (A_p и Dst): они бывают и более значительными и более слабыми.

Таким образом, влияние зимних возмущений заключается в уменьшении N_e в основном на высоте 190 км и в меньшей степени — на нижних высотах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные результаты указывают на летне-зимнюю асимметрию отклика N_e на геомагнитные

бури на высотах слоя F1 на среднеширотной ст. Иркутск в 2003 г.

- В летнее время воздействие геомагнитных бурь на N_e незначительно на всех рассматриваемых высотах.

- Эффект зимних бурь проявляется в существенном уменьшении N_e на всех высотах: сильнее всего — на высоте 190 км и в меньшей степени — на нижних высотах.

- Для всех рассмотренных возмущений их воздействие на N_e на высотах слоя F1 во все сезоны всегда отрицательно, т. е. приводит к уменьшению N_e .

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Полех Н.М., Ратовский К.Г. Эффекты геомагнитных бурь на высотах ионосферного слоя F1 в регионе Иркутска в период спада и минимума солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 22. С. 31–34.

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Эффекты геомагнитных бурь на высотах слоя F1 в разные периоды солнечной активности (ст. Иркутск). *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2018. Т. 58, № 2. С. 211–216. DOI: [10.7868/S0016794018020062](https://doi.org/10.7868/S0016794018020062).

Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 г. Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года» (СЭС-2003). *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 5. С. 509–554.

Полех Н.М., Черниговская М.А., Яковлева О.Е. К вопросу о формировании слоя F1 во время внезапных стратосферных потеплений. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 140–152. DOI: [10.12737/szf-53201914](https://doi.org/10.12737/szf-53201914).

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. Vol. 63. P. 537–544.

Buresova D., Lastovicka J., Altadill D., Miro G. Daytime electron density at the F1-region in Europe during geomagnetic storms. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1007–1021.

Mikhailov A., Schlegel K. Geomagnetic storm effects at F1-layer heights from incoherent scatter observations. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21, iss. 2. P. 583–596. DOI: [10.5194/ANGEO-21-583-2003](https://doi.org/10.5194/ANGEO-21-583-2003).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 2 октября 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 2 октября 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М., Яковлева О.Е. Дневная электронная плотность на высотах ионосферного слоя F1 во время геомагнитных возмущений на станции Иркутск. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 58–61. DOI: [10.12737/szf-81202207](https://doi.org/10.12737/szf-81202207).